

**HANGOLHATÓ, HOSSZÚ REZONÁTOROS, FEMTOSZEKUNDUMOS
TITÁN-ZAFÍR LÉZER FEJLESZTÉSE;
ÉS DIELEKTRIKUM TÜKRÖK CSOPORTKÉSELTETÉS-FÜGGŐ
VESZTESÉGE**

Doktori értekezés tézisei

Írta:

Antal Péter Gyula

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Fizika Doktori Iskola

(Vezetője: Dr. Csikor Ferenc)

Statisztikus fizika, biológiai fizika és kvantumrendszerek fizikája
program

(Vezetője: Dr. Kürti Jenő)

Témavezető:

Szipőcs Róbert, PhD

2012

Előzmények és célkitűzések

Doktori munkámat a Magyar Tudományos Akadémia Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézetének munkatársaként végeztem, a Lézeralkalmazási Osztályon. Témavezetőm dr. Szipőcs Róbert volt. Két különálló témával foglalkoztam. Az egyik egy hosszú rezonátoros, széles sávban hangolható hullámhosszú, femtoszekundumos titán-zafir lézer fejlesztése nemlineáris mikroszkópiai alkalmazásokhoz. A másik téma keretében dielektrikum multiréteg-tükrök csoportkéseletetése, a bennük felépülő állóhullámú elektromágneses tér által tárolt energia és a tükrök abszorptanciája közötti kapcsolat elméleti vizsgálatával foglalkoztam.

A femtoszekundumos lézerek egyik legfontosabb képviselői a titán-zafir lézerek, többek között azért, mert nagy erősítési sávzélességük lehetővé teszi a hullámhossz több száz nanométer széles tartományban való hangolását, illetve 10 fs-nál rövidebb lézerimpulzusok előállítását. A hagyományos, kereskedelmi forgalomban kapható titán-zafir lézerek kimenetén a lézerimpulzusok ismétlési frekvenciája 80 MHz körül van. Ez az ismétlési frekvencia és az emellett elérhető egyéb lézerparaméterek (impulzusenergia, csúcsteljesítmény) azonban nem minden alkalmazási területen optimálisak. Gyakran ennél lényegesen kisebb ismétlési frekvenciára van szükség, ami legegyszerűbben hosszú lézerrezonátor alkalmazásával biztosítható, mivel a módusszinkronizált lézerek esetében a rezonátor hossza fordítottan arányos az ismétlési frekvenciával.

A hosszú rezonátoros lézereket legtöbbször úgy építik meg, hogy egy kb. 80 MHz frekvenciájú lézert egészítsenek ki egy úgynevezett Herriott-cellával. Ez egy két szembefordított homorú gömbtükörből (vagy egy gömb- és egy síktükörből) álló elrendezés, melyben a nyaláb többszörös visszaverődése biztosítja a nagy úthosszat. A tükrök távolságának és a reflexiók számának megfelelő megválasztásával elérhető, hogy a cella beépítése a lézermódus paramétereit ne változtassa meg. Az első hosszú rezonátoros titán-zafir lézert is ennek a módszernek a kihasználásával valósították meg 1999-ben, amely 15 MHz-es ismétlési frekvenciával rendelkezett. A rezonátor meghosszabbításának másik előnye, hogy az egységnyi kimeneti átlagteljesítményhez, illetve egységnyi pumpálási teljesítményhez tartozó impulzusenergia a rezonátorhosszal egyenes arányban megnövekszik. Éppen ezért a hosszú rezonátoros titán-zafir lézerek egyik fontos alkalmazási területe a nagy, akár 500 nJ-t is meghaladó impulzusenergiák előállítása, közvetlenül a lézerrezonátor kimenetén, dinamikus kicsatolás vagy lézererősítők alkalmazása nélkül. A nagy impulzusenergiák miatt a lézerkristályban fellépő nemlinearitás túl erőssé és ezáltal a módusszinkronizált lézerműködés

pedig instabillá válhat, ami akár a rezonátoron belül oszcilláló impulzus több impulzusra történő felhasadásához is vezethet. Ezt úgy előzik meg, hogy lecsökkentik a csúcsintenzitást a kristályban úgy, hogy például megnövelik a módus foltméretét, illetve a rezonátor eredő diszperzióját nagy negatív vagy kis pozitív értékre állítják be. Pozitív diszperzió esetén azonban, a lézer kimeneti impulzusai nem közel transzformáció-limitáltak, hanem erősen csörpöltek lesznek, melyeket kompresszálni kell a rezonátoron kívül.

Hosszú rezonátoros femtoszekundumos lézereket alkalmaztak már mikroszkópiás képalkotási eljárásokban is. Az egyik ilyen a fluoreszcencia-élettartam mérésen alapuló mikroszkópia (Fluorescence Lifetime Imaging Microscopy, FLIM), ahol a mintában (pl. sejtben) levő molekulák fluoreszcencia-élettartamának mérésével alkotnak képet a különböző molekulák térbeli eloszlásáról és kémiai környezetéről. Bizonyos hosszú fluoreszcencia-élettartammal rendelkező molekulák azonosításához kis ismétlési frekvenciájú lézerekre van szükség. Elsősorban Nd:YVO₄ és Yb:KGW erősítőközeggel működő típusokról olvashatunk az irodalomban, melyeket FLIM-ben alkalmaztak. A hosszú rezonátorral előállítható viszonylag magas impulzus-csúcseljesítmény is hasznos lehet, ha a megfelelő gerjesztési hullámhosszakat nemlineáris optikai módszerekkel kell előállítani.

Egy másik alkalmazási terület lehet a nemlineáris, elsősorban a multifoton-mikroszkópia is. Ennél az eljárásnál a femtoszekundumos impulzusokat a mintára fókuszálják, ahol két- vagy háromfotonos abszorpció következik be, de csak a megfelelően nagy intenzitással rendelkező fókuszolt parányi térfogatában. Így nagy felbontású, 3D képek alkothatók a szövetekről, sejtekről. A biológiai mintát ugyanakkor kémiai károsíthatja a többfotonos gerjesztés (pl. DNS károsodás), valamint az infravörösben erősen abszorbeáló anyagokat tartalmazó mintákban (pl. bőr) az egyfotonos gerjesztés jelentős hőtermelése miatt is bekövetkezhethet károsodás. Ez utóbbi hőmérsékleti károsodás kockázata jelentősen méréselkelhető az ismétlési frekvencia csökkentésével. A nemlineáris mikroszkópoknál a sejtkárosító hatások minimalizálása már csak azért is különösen fontos, mert nagy az igény az humán orvosi diagnosztikában, élő szervezeten belül végzett, úgynevezett *in vivo* vizsgálatokban történő alkalmazásukra. Többfoton-mikroszkópos technikával, többek között, a bőrrák is diagnosztizálható. Egy hagyományos, 80 MHz-es femtoszekundumos titán-zafir lézerre épülő multifoton-mikroszkóp rendszer humán klinikai alkalmazását néhány éve engedélyezték az Európai Unióban.

A hosszú rezonátoros femto- vagy pikoszekundumos szilárdtest-lézerek egyik leggyümölcsözőbb alkalmazási területe tehát a FLIM vagy a többfoton-mikroszkópia lehet. Mivel a biológiai mintákban sokféle, különböző hullámhosszon gerjeszthető fluoreszcens

molekula fordul elő, ezért az eddig felsoroltakon kívül az ilyen fényforrásokkal szemben támasztott további fontos követelmény a hullámhossz széles tartományban történő hangolásának lehetősége. Ugyanakkor a szakirodalomban sehol sem találtam említést hangolható hullámhosszú, hosszú rezonátoros rövidimpulzusú lézerről. Munkám célja éppen ezért egy széles sávban hangolható, kb. 20 MHz ismétlési frekvenciájú, hosszú rezonátoros, femtoszekundumos titán-zafir kifejlesztése volt. A nagy rezonátorhossz miatt, ugyanakkor, az impulzusüzemű működés pumpálási küszöbteljesítményének jelentős csökkenése is várható volt, ami olcsóbb pumpalézerek használatát tenné lehetővé a ~80 MHz-es típusokhoz képest.

Doktori dolgozatom másik témája egy dielektrikum multiréteg-tükrökkel kapcsolatos elméleti jellegű munka. E tükrökkel egy adott tervezési hullámhossz valamekkora környezetében nagyobb (közel 100%-os) reflektancia érhető el, mint fémtükrökkel. Ez a lézerek és egyéb rezonátorral rendelkező fényforrások, például optikai parametrikus oszcillátorok (OPO-k), esetében alapvető fontosságú, hiszen ezek az eszközök csak kis rezonátorvesztesség mellett tudnak hatékonyan működni. Ezeket a rezonátorokat tehát megfelelő multiréteg tükrökből állítják össze, és legtöbbször a fény rezonátoron kívüli tereléséhez is ilyen tükröket használnak. A tükröre eső fénynek az a része, amely nem nyelődik el, részben transzmittálódik, részben pedig szóródik és abszorbeálódik a tükrör térfogatában. Az elnyelt energia a tükrör hőmérsékletét növeli, ami tükrörfelület deformációjához, és így a reflektált nyaláb hullámfrontjának torzulásához vezethet, lerontva ez által például a fókuszálhatóságot. Nagyteljesítményű lézerrendszerek, erősítők, OPO-k vagy optikai parametrikus erősítők (OPA-k) esetében az abszorpcióból származó melegeedés hatására bekövetkezhet a tükrörfelület roncsolódása is. Az egyfotonos abszorpció okozta melegeedés elsősorban 50 ps-nál hosszabb impulzusokkal működő rendszerek esetében kritikus, mert ennél rövidebb impulzusok esetén a többfotonos abszorpció és lavina ionizáció felelős elsődlegesen a roncsolódásért. A reflektancián, abszorptancián és a roncsolási küszöbön kívül a tükröknek lényeges paramétere még a sáv szélességük, azaz a nagyreflexiójú hullámhossztartományuk szélessége. Sok esetben ugyanis, például spektroszkópiában vagy az említett lézermikroszkópiai alkalmazásokban használt lézer- vagy optikai parametrikus fényforrásokban, a hullámhossz hangolhatósága érdekében szélessávú tükrökre van szükség. Ezen kívül a szélessávú lézerműködés az ultrarövid, azaz a piko- femto- vagy attoszekundumos impulzusok előállításához is elengedhetetlen.

Az ultrarövid impulzusú fényforrásoknál az impulzusok rezonátoron belüli vagy kívüli diszperzió-kompenzálására is szükség van. Megfelelő szerkezetű multiréteg tükrök, az

úgynevezett diszperziós tükrök segítségével jóval nagyobb csoportkésltetés diszperzió (GDD) valósítható meg, mint a hagyományos, negyedhullámú tükrökkel. Az első olyan tükröket, melyek diszperziós függvénye viszonylag szabadon, másodrendnél magasabb rendben is beállítható volt témavezetőm, Szipőcs Róbert találta fel a 90-es évek elején – ezek voltak az úgynevezett csörpölt tükrök, melyekben a fény frekvenciafüggő behatolási mélysége a diszperzió forrása. Ezeket napjainkban világszerte alkalmazzák, elsősorban ultrarövid impulzusú lézerekben. Léteznek állóhullámú rezonanciák elvén működő egy- vagy többüreges Gires-Tournois interferométer szerkezetű diszperziós tükrök is, melyekkel akár -2000 fs^2 GDD is elérhető, egy reflexióra. A csörpölt tükrök használata ugyanakkor a hosszabb impulzusú vagy akár CW rendszerekben is nélkülözhetetlen, ha a hullámhossz szélessávú hangolhatósága a cél. A 200, de akár a 300 nm-t is meghaladó reflexió-sáv szélesség ugyanis csak ilyen csörpölt szerkezetekkel valósítható meg (ultraszélessávú csörpölt tükrök, UBCM).

Felmerül a kérdés, hogy a fázistolás befolyásolja-e a rétegszerkezetben abszorbeált energia mennyiségét. Ezt a témát, ismeretim szerint, először egy 1992-ben megjelent publikáció érinti, ahol a szerzők speciálisan a negyedhullámú tükrökre, a tükrök középhullámhosszán mutatták ki analitikusan, hogy bizonyos feltételek (a rétegek kis törésmutató-különbsége és egyéb megszorítások) mellett az abszorptancia arányos a csoportkésltetéssel. Egy 1993-as cikkben témavezetőm rámutatott arra, szintén egy speciális tükröszerkezetre végzett numerikus számítás alapján, hogy széles hullámhossztartományban is arányosság fedezhető fel a csoportkésltetés és az abszorptancia között. A csoportkésltetés és a tükrök rétegszerkezetében tárolt elektromágneses energia kapcsolatára vonatkozó említések is találhatók az irodalomban. Az energiaáramlásra vonatkozó kontinuitási egyenlet alapján, egy általános egydimenziós fotonikus akadály (pl. egy tükrök) veszteségmentes esetére, analitikusan levezethető, hogy

$$R\tau_{gr} + T\tau_{gt} = \frac{U}{P_i} \quad (1)$$

ahol τ_{gt} és τ_{gr} a transzmissziós és a reflexiós csoportkésltetés, R és T az reflektancia és transzmittancia, U az akadály térfogatában tárolt elektromágneses energia, P_i pedig a beeső fényteljesítmény. Erre a levezetésre H. G. Winful 2006-os cikkében találtam rá. Szintén itt van leírva, hogy veszteségmentes és stacionárius esetben a tárolt energia τ_c (rezonátor-)élettartama egyenlő (1) jobb oldalával:

$$\tau_c = \frac{U}{P_i} \quad (2)$$

A fent felsorolt észrevételekből és a fenti képletből kiindulva feltételeztem, hogy a dielektrikum tükrök nagyreflexiójú tartományán belül általános összefüggés, közelítő arányosság áll fenn a tükrök reflexiós csoportképletetése, abszorptanciája, és a reflexió során tárolódó energia között, ha a rétegek abszorpciós vesztesége a gyakorlatban előforduló viszonylag kis értéken van. Munkám célja e feltevés helyességének és annak az ellenőrzése, hogy pontosan milyen feltételek, mekkora veszteségek mellett érvényesek ezek az összefüggések. A csoportképletetés és az abszorptancia kapcsolatának komoly gyakorlati következményei lehetnek bizonyos lézeres alkalmazások esetén, amikor a megfelelő tükrök kiválasztásáról, tervezéséről, illetve a lézerrendszer technikai megvalósításáról van szó. E két mennyiség kapcsolata ugyanakkor a csoportképletetésnek a tárolt energiához való viszonya alapján érthető meg.

Alkalmazott módszerek

A hangolható, hosszú rezonátoros lézer megépítéséhez kiindulásként egy, mások által korábban már megtervezett, kb. 71 MHz ismétlési frekvenciájú, asztigmatikusan kompenzált, lineáris titán-zafir lézerrezonátort vettem alapul. A lézerezősítő közeg egy erősen adalékolt titán-zafir kristály, melyben a fény úthossza 4 mm. Ezt a rezonátort egészítettem ki egy megfelelően megtervezett Herriott-cellával a kb. 20 MHz-es ismétlési frekvencia elérése érdekében. A lézert negatív rezonátor-diszperzió mellett működtettem, a diszperzió-kompenzálást prizmapárral oldottam meg, melyben a prizmák a nyalábra merőlegesen mozgathatók, így a diszperzió finoman szabályozható. A lézer hullámhosszát egy kettőtörő szűrő forgatásával lehet hangolni. A pumpálás egy frekvencia-kétszerezett, 532 nm-en működő Nd:YVO₄ lézerrel történt. Kétféle lézerezrendezést is építettem. Az elsőben a módusszinkronizációt egy akusztó-optikai modulátorral indítottam be, melyet regeneratív visszacsatolásos módszerrel működtettem, a femtoszekundumos impulzushossz elérését azonban a lágy apertúras Kerr-lencse effektus tette lehetővé. A rezonátortükrök között elektronsugaras párologtatással és ionos porlasztással készült típusok voltak, a legtöbb reflexió az előbbi technológiával készült Herriott-cella tükrökön történt, tükrönként 7-7. Ebben az elrendezésben az ismétlési frekvencia 19,6 MHz volt és a hullámhosszat 115 nm széles tartományban lehetett hangolni. A másik elrendezésben a rezonátortükröket (technikai okokból egy kivételével) kicseréltem ionosan porlasztott, tehát kis veszteségű, ultraszélessávú csörpölt tükrökre, és egy másik Herriott-cellát konfigurációt használtam, tükrönként 2-2

reflexióval. Az akusztó-optikai cellát itt már nem alkalmaztam, és kemény apertúras Kerr-lencsés módszerrel módusszinkronizáltam a lézert. Ez a lézerverzió az ismétlési frekvenciája 22,2 MHz volt és a hullámhossza 170 nm sávszélességben lehetett hangolni. A rezonátor geometriai paramétereinek további optimalizálásával a hangolási tartomány szélességét sikerült 185 nm-re is megnövelni. A megépített lézereknek megmértem a kimeneti átlagteljesítményét a hullámhossz függvényében, a hangolás során, illetve meghatároztam az impulzushosszat, másodrendű autokorreláció mérés segítségével. Elvégeztem egy multifoton-mikroszkópos mérést, ahol először egy hagyományos, 76 MHz-es titán-zafir lézert, majd az általam épített, 22,2 MHz-es lézerverziót használtam fényforrássul, és megállapítottam, hogy azonos kétfoton-abszorpciós fluoreszcencia jelet a 22,2 MHz-es lézerral közel fele akkora, 1,82-szer kisebb, átlagteljesítményű gerjesztéssel lehet elérni, mint a 76 MHz-essel, ha a két lézer kimenetének többi paramétere megegyezik. A 22,2 MHz-es lézer esetében másodrendű autokorreláció méréssel meghatároztam az impulzushosszat a mikroszkóp fókuszában, a kétfoton-abszorpciót használva az intenzitás négyzetével arányos autokorreláció-jel generálásához. A mikroszkópos mérésekhez fluoreszcens mikrogyöngyöket használtam mintaként, illetve egy esetben egy biológiai mintát is (egy szőrtelenített egérbőr darabot).

A vékonyréteg tükrökkel kapcsolatban elméleti munkát végeztem. Az (1) összefüggésből indultam ki, melyből látszik, hogy $T_{gr} \ll R_{gr}$ esetén a tükör nagyreflexiójú ($R \approx 1$) tartományában a reflexiós csoportkésleltetés (GD) és a tárolt energia arányosak egymással, a veszteségmentes esetben. Azzal az intuitív feltevéssel éltem, hogy ez kis veszteségek esetén is jó közelítéssel érvényes marad. A (2) képlet alapján az is várható, hogy kis veszteségek esetén a tükrök csoportkésleltetése és abszorptanciája között is közelítőleg egyenes arányossági áll fenn. A fentiekből természetesen az is következik, hogy a tárolt energia és az abszorptancia is várhatóan arányosak egymással. Ezeket a feltevéseket négy, különböző típusú tükröszervezetekre elvégzett numerikus számításokkal támasztottam alá. Ezek között volt egy negyedhullámú (QW) tükör, egy ultraszélessávú csörpölt tükör (UBCM) és két többüreges Gires-Tournois interferométer (MCGTI) szerkezetű tükör. A QW tükör és az UBCM esetében a GDD-t, azaz a GD frekvenciafüggését az elektromágneses tér behatolási mélysége, míg az MCGTI tükröknél a különböző mélységben levő ún. spacer rétegekben megjelenő rezonanciák és a behatolási mélység kombinációja határozza meg. A QW tükör GDD-je a legkisebb, az UBCM-é jelentősen nagyobb, és az MCGTI tükrök rendelkeznek a legnagyobb diszperzióval. Ennek megfelelően a QW tükröknél fordulnak elő a legkisebb, az MCGTI-knél a legnagyobb csoportkésleltetés értékek. A két MCGTI tükör ugyanolyan vastag, ugyanannyi

rétegből épül fel, ugyanolyan anyagú kétféle rétegből. Úgy lettek megtervezve, hogy a releváns (közel konstans GDD-jű) hullámhossz-tartományban hasonló legyen a csoportképletelés-függvényük, és a GD maximális értéke nagyon jó közelítéssel megegyezzen. E két tükrök között annyi a különbség, hogy a bennük levő rezonáns spacer rétegek anyagának vesztesége különböző. Kiderült azonban, hogy ennek ellenére a két tükrök abszorptanciája nem különbözik jelentősen. A tükrökre vonatkozó mennyiségeket (pl. csoportképletelés, tárolt energia, abszorptancia) a vékonyréteg-technológiában széles körben használt transzfer-mátrix módszerrel számoltam ki, merőleges beesésre. A fent felsorolt mennyiségekből páronként képzett arányok normált relatív változásának vizsgálata révén elemeztem, hogy a nagy transzmissziós csoportképletetést okozó (Fabry-Perot típusú) rezonanciák milyen hatással vannak e mennyiségek arányosságára. Azt, hogy az egyes tükrök esetében ezek a fizikai mennyiségek milyen mértékben tekinthetők arányosnak egymással, az egyes mennyiségpárok közötti függvénykapcsolatra illeszkedő, origón átmenő egyenesek illesztésével ellenőriztem. Megnéztem azt is, hogy mennyire jól illeszkednek origón nem feltétlenül átmenő, általános egyenesek ezekre az adatsorokra. Az illesztések jóságának jellemzésére a korrigált R-négyszet (adjusted R-square) mutatót használtam. Az elemzést először az egyes tükrök nagyreflektanciájú és megfelelő diszperziójú ún. használható sávjára végeztem el a hullámhossz függvényében változó GD-re, tárolt energiára és abszorptanciára, többféle, különböző veszteségű esetre is. A rétegek extinkciós tényezőit hol azonosnak, hol eltérőnek feltételeztem, és dielektrikum-tükröknél (a közeli infravörösben) a gyakorlatban jellemző $10^{-5} - 10^{-3}$ határok között változtattam. Az extinkciós tényezőket hullámhossz-függetlennek vettem ugyan, de a veszteséget a hullámhosszal fordítottan arányos abszorpciós tényező határozza meg. Ezért úgy is elvégeztem a GD és az abszorptancia arányosságának elemzését, hogy egy adott hullámhosszon vizsgáltam különböző szerkezetű, de azonos anyagokból felépülő tükrökre vonatkozó értékeiket. Az elemzéshez szükséges új tükrőszerkezetek sorozatát úgy kaptam, hogy a már meglevők rétegeinek fizikai vastagságát arányosan átskáláztam.

Új eredmények (tézispontok)

- T1.** Kifejlesztettem egy 170 nm széles sávban hangolható hullámhosszú, hosszú rezonátoros, femtoszekundumos titán-zafír lézert, melynek ismétlési frekvenciája a hagyományos, ~80 MHz-es titán-zafír lézerekének körülbelül negyede, 22,2 MHz. A módusszinkronizálást a Kerr-lencsés módszerrel oldottam meg. A negatív rezonátor-diszperzióval rendelkező lézer közel transzformáció-limitált, tipikusan 180 – 300 fs

időtartamú impulzusokat állít elő. Impulzusüzeműben már alacsonynak számító, 2,6 W vagy kisebb pumpálás mellett is stabilan működik, és maximálisan 311 mW-os kimeneti átlagteljesítmény érhető el vele. A rezonátor további optimalizálásával a hangolási tartomány szélességét sikerült 185 nm-re is növelni.

- T2.** Elméleti megfontolásokból kiindulva, numerikus példákon keresztül részletesen megvizsgáltam a nagyreflexiójú dielektrikum multiréteg-tükrök reflexiós csoportképletetése, abszorptanciája és a reflexió során a tükröszerkezetben felépülő állóhullámú elektromágneses tér által tárolt energia közötti fizikai összefüggéseket. Az elemzést különböző típusú tükrökre és különböző veszteségű esetekre végeztem el. Megállapítottam, hogy a diszperziós tükrök nagyreflektanciájú tartományán belül (nagy transzmissziós csoportképletetést előidéző Fabry-Perot típusú rezonanciák hiányában), a tárolt energia és a reflexiós csoportképletetés gyakorlatilag arányos egymással, míg e két fizikai mennyiség és az abszorpciós veszteség között is erős pozitív korreláció van.

Következtetések

Elsőként építettem olyan hosszú rezonátoros femtoszekundumos szilárdtest-lézert, melynek *hangolható a hullámhossza*. Emiatt és a hagyományos, ~80 MHz-es típusokéhoz képest jóval kisebb ismétlési frekvencia miatt a lézer megfelelő fényforrás lehet bizonyos mikroszkópos képalkotó eljárásokban. Ilyen például a FLIM, ahol a hosszú fluoreszcencia-élettartammal rendelkező molekulákat tartalmazó minták vizsgálata csak kis ismétlési frekvenciájú impulzusokkal lehetséges. A multifoton-mikroszkópiában a minta hőmérsékleti károsodásának kockázata csökkenthető a kis ismétlési frekvenciának köszönhetően. Ez különösen a titán-zafir lézer közeli infravörös hullámhosszán erős egyfotonos abszorpciót mutató minták esetén kritikus, mint például a melanint tartalmazó bőr vizsgálatánál, vagy a fluoreszcens festékkel festett agyszeletek tanulmányozásánál. A hullámhossz hangolhatósága biztosítja, hogy a biológiai mintákban előforduló, különböző fluoreszcens molekulákat mindig maximális hatékonysággal tudjuk gerjeszteni, vagy egyáltalán kimutatni a jelenlétüket. Az általam épített lézernek a ~80 MHz-es lézerekhez képest jóval kisebb (impulzusüzemre vonatkozó) pumpálási küszöbe olcsóbb pumpalézer használatát is lehetővé teszi. Van rá esély, hogy az előnyös tulajdonságoknak köszönhetően a lézer az *in vivo* humán orvosi diagnosztikában is felhasználásra kerülhet, ehhez azonban még el kell végezni a megfelelő

teszteket arra vonatkozóan, hogy milyen mértékű kémiai sejt és DNS-károsodást okoz a multifoton-mikroszkópos mérések során. Ezek a vizsgálatok folyamatban vannak.

A dielektrikum multiréteg-tükrökkel kapcsolatos munkám rávilágított, hogy a diszperziós tükrökben abszorbeált fényteljesítmény függ a reflexiós csoportképlettetéstől, méghozzá erős pozitív korreláció van közöttük. Ennek az összefüggésnek a tükrök tervezésekor és az adott alkalmazáshoz megfelelő tükrök kiválasztásánál történő figyelembe vétele fontos lehet bizonyos esetekben. Elsősorban akkor, amikor a nagy csoportképlettetésekkel rendelkező diszperziós tükrök használatára van szükség, például rövidimpulzusú lézereknél és a széles sávban hangolható lézeres fényforrásokban. Látszik például az, hogy a szélessávú hangolhatóságot biztosító csörpölt tükröket még akkor is érdemes úgy tervezni, hogy a kisebb anyagi veszteséget jelentő hosszabb hullámhosszak felé nőjön a csoportképlettetésük, ha nem diszperzió-kompenzálásra használjuk őket. Diszperziós tükrök nagyteljesítményű rendszerekben való alkalmazásakor számolnunk kell azzal is, hogy a visszavert nyaláb hullámfrontja a tükrő melegedésének hatására jobban torzulhat, mint kis diszperziójú tükrök használata esetén. Ha a lézerimpulzusok időtartama meghaladja az 50 ps-ot, nagyobb reflexiós csoportképlettetés esetén nagyobb esélye van a tükrőfelület roncsolódásának is. Ez mindenekelőtt a nagyteljesítményű, a spektrum ultraibolya, látható vagy közeli infravörös tartományában működő szélessávú vagy széles sávban hangolható lézerrendszerek, optikai parametrikus oszcillátorok és erősítők esetén fontos, ahol szélessávú csörpölt dielektrikum tükrök használata szükséges.

A tézisek alapjául szolgáló közlemények

A T1 tézisponthoz:

- [1] P.G. Antal, R. Szipőcs, "Tunable, low-repetition-rate, cost-efficient femtosecond Ti:sapphire laser for nonlinear microscopy," Appl. Phys B, DOI 10.1007/s00340-011-4830-7, *online megjelent* 2011. Nov. 25.
- [2] R. Szipőcs, P. G. Antal, A. Szigligeti, A. Kolonics, "Tunable, Low Repetition Rate, Femtosecond Pulse Ti:Sapphire Laser for In Vivo Imaging by Nonlinear Microscopy," *Novel Techniques in Microscopy*, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2011), paper JTuA12.

A T2 tézisponthoz:

- [1] P. G. Antal, R. Szipőcs, "Relationships among group delay, energy storage, and loss in dispersive dielectric mirrors," *Chin. Opt. Lett., közlésre elfogadva*.
- [2] P. Gy. Antal, R. Szipőcs, "Relation between Group Delay and Energy Storage in Dispersive Dielectric Mirror Coatings," *Advanced Solid-State Photonics, OSA Technical Digest Series (CD) (Optical Society of America, 2010)*, paper AMB17.
- [3] P. Antal, R. Szipőcs, "Relation between Group Delay, Energy Storage and Absorbed/Scattered Power in Highly Reflective Dispersive Dielectric Mirror Coatings," *Optical Interference Coatings, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2010)*, paper FB3.
- [4] Antal Péter Gyula, Szipőcs Róbert, "A csoportkéseletetés, a tárolt energia és az abszorpciós/szórás veszteség kapcsolata diszperziós dielektrikum tükrökben," *Fizikus Vándorgyűlés 2010*, Kivonatok Gyűjteménye, 1. oldal.

Egyéb, a témához kapcsolódó közlemények

- P. Dombi, P. Antal, "Investigation of a 200-nJ chirped-pulse Ti:Sapphire oscillator for white light generation," *Laser Phys. Lett.* **4**, 538-542 (2007).
- P. Dombi, P. Antal, J. Fekete, R. Szipőcs, Z. Várallyay, "Chirped-pulse supercontinuum generation with a long-cavity Ti:sapphire oscillator," *Appl. Phys. B* **88**, 379-384 (2007).